

С. А. Демьянов, С. А. Кораблев, В. К. Семенов

Ивановский государственный энергетический университет,

г. Иваново

demianovsergey@mail.ru

ПРОГНОЗ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

В рамках математической модели непрерывного марковского процесса накопления числа дефектов оборудования АЭС решается задача прогнозирования остаточного ресурса энергетического оборудования АЭС, а также проводится верификация математической модели. В работе получена функция прогноза числа дефектов на основе решения уравнения Фоккера-Планка, и рассчитан теоретический остаточный ресурс энергетического оборудования.

Ключевые слова: прогноз; энергетическое оборудование; марковский процесс; функция прогноза; уравнение Фоккера-Планка.

S. A. Demianov, S. A. Korablev, V. K. Semenov

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo

FORECASTING RESIDUAL LIFE OF POWERGENERATING EQUIPMENT OF NPP

The problem of forecasting the residual life of power-generating equipment of NPP is solved in the framework of the mathematical model of the continuous Markov process of accumulating the number of defects in NPP equipment, this model is verified as well. The forecast function of the number of defects was obtained on the basis of the Fokker-Planck equations solutions and the theoretical residual resource of power-generating equipment was calculated.

Key words: forecast; power-generating equipment; Markov process; forecast function; Fokker-Planck equation.

Энергетическое оборудование многих стареющих электрических станций, работающее в тяжелых условиях, приближается к исчерпанию своего ресурса. В сложившейся

ситуации для исключения катастрофических последствий, связанных с выходом из строя указанных аппаратов, требуется решить две взаимосвязанные задачи. С одной стороны, необходима организация постоянного многопараметрического контроля состояния оборудования. С другой стороны, на основе поступающей информации об оборудовании необходимо прогнозировать его состояние на будущее.

Математические модели могут быть детерминированными и стохастическими. Детерминированный уровень описания основывается на динамическом законе, позволяющем прогнозировать рост дефектов точно без учета их флуктуаций. Стохастический способ описания основывается на том факте, что рассматриваемый процесс старения объекта является случайным и подчиняется вероятностному закону. Этот способ описания является наиболее полным, т. к., наряду со средними величинами дефектов, позволяет прогнозировать дисперсию числа дефектов. Функция прогноза должна определяться не произвольным подбором подходящей аналитической зависимости, а на основе выявления физического закона роста дефектов в элементах оборудования. Прогноз должен верифицироваться на основе постоянно поступающих сведений об объекте исследования.

Для решения поставленной задачи необходимо сформулировать физико-математическую модель роста дефектов в оборудовании, верифицировать ее на основе данных мониторинга объекта. В соответствии с этим все дефекты, возникающие в оборудовании, разделим на крупные и мелкие. Крупные (внезапные) повреждения оборудования являются событиями чрезвычайно редкими и плохо предсказуемыми. Накопление мелких дефектов определяет процесс старения оборудования и, стало быть, его ресурс. Задача прогноза ресурса оборудования, обусловленного его старением, должна заключаться в определении времени достижения числом дефектов некоторого критического значения, превышение которого может привести к катастрофическим последствиям.

Старение оборудования вызвано действием многих механизмов: тепловым и динамическим режимом работы, физико-химическими процессами на поверхности металла, обуславливающими коррозию и

растрескивание, изменением структуры металла под действием нагрузок и пр. Комплекс вышеперечисленных условий определяет тенденцию, т. е. закон старения и роста дефектов, который в каждом конкретном случае, в силу той или иной комбинации этих условий, будет принимать разные формы, сохраняя при этом свои главные общие черты.

Процесс роста дефектов определяется большим комплексом условий. Многие величины, характеризующие эти условия, можно считать определенными, детерминированными, тогда как сам процесс будем считать случайным и число дефектов – случайной величиной.

Далее допустим, что стохастический процесс роста числа дефектов является Марковским процессом, т. е. определяемая выше вероятность зависит от начального числа дефектов N_0 и не зависит от предшествующего момента t_0 истории поведения аппарата. Процесс накопления дефектов будем считать непрерывным во времени и в пространстве состояние (т. е. по числу дефектов), подчиняющийся уравнению Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial \rho(N,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial N} [A(N,t)\rho(N,t)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial N^2} [B(N,t)\rho(N,t)], \quad (1)$$

где $A(N,t), B(N,t)$ – кинетические коэффициенты, представляющие собой среднее и среднеквадратичное число дефектов. Поскольку практику в первую очередь при прогнозировании состояния аппарата интересует среднее число дефектов и дисперсия распределения, то можно используя метод моментов, найти уравнения для средних величин. Несложно показать, что после математических преобразований с учётом малости дисперсии получается следующее уравнение для среднего числа элементов без дефектов:

$$\frac{d \langle N(t) \rangle}{dt} = A(\langle N(t) \rangle), \quad (2)$$

где $\langle N(t) \rangle$ – среднее число элементов без дефектов, $A(\langle N(t) \rangle)$ – поток от среднего числа дефектов.

В результате решения уравнения (2) была получена функция прогноза. После обработки экспериментальных данных были получены эмпирические коэффициенты функции прогноза и проведена ее верификация для четырех парогенераторов первого блока КАЭС.